Projekt manipulatora dla robota mobilnego Elektron

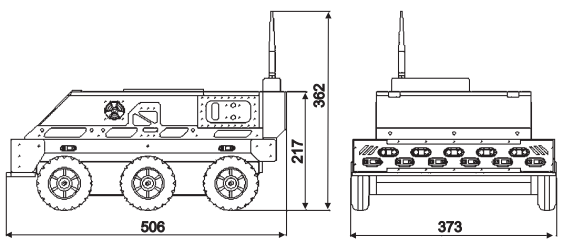
Krzysztof Mianowski

W pracy przedstawiono projekt małego, lekkiego manipulatora o konstrukcji modułowej przeznaczonego do zabudowy na miniaturowym robocie mobilnym Elektron. Manipulator ma konstrukcję przegubową o 5 stopniach swobody. Po wyposażeniu robota z manipulatorem w chwytaki, haki, uchwyty dla kamer lub narzędzi specjalnych albo specjalne zderzaki, jego zadaniem ma być obsługa typowych zadań manipulacyjnych, jakie mogą wystąpić podczas realizacji misji inspekcyjnych i/lub interwencyjnych. Podstawową zaletą rozwiązania w porównaniu z typowymi, dużymi robotami interwencyjno-inspekcyjnymi jest możliwość wykonywania zadań w warunkach, w jakich duże roboty nie są w stanie podejmować akcji. Przewiduje się również, że kilka małych robotów współpracując ze sobą może obsłużyć podobne zadania jak robot duży, za to w warunkach, w których duży robot nie jest w stanie podjąć akcji. Niezależnie od wymienionych zalet, rozwiązanie, o którym mowa w artykule, jest znacznie lżejsze, co zapewnia łatwiejszy transport. Inną ważną zaletą konstrukcji jest niski koszt wykonania. Opracowany manipulator można zastosować jako niezależny moduł także do innych zadań, np. w celach dydaktycznych. Projekt manipulatora wykonano w systemie AutoCAD oraz ProEngineer, możliwa jest więc prawie „automatyczna" zmiana wymiarów w celu zmiany podstawowych parametrów dla innych zastosowań.

Miniaturowe roboty mobilne pozwalają na obsługę prac inspekcyjnych i interwencyjnych w warunkach, w których – z uwagi na wymiary i masę – typowe, duże roboty jak Inspector czy Ekspert [13] nie mogą być stosowane. Robot mobilny Elektron powstał we współpracy Instytutu Automatyki i Robotyki Wydziału Mechatroniki oraz Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej w ramach grantu MNiI nr 3T11A0009/29 w roku 2005 [2, 10]. Początkowo był przewidziany jako platforma laboratoryjna do badań nad systemami sterowania i nawigacji robotów mobilnych. Aktualnie w ramach prac własnych PW są prowadzone dalsze prace zmierzające do rozszerzenia zakresu potencjalnych zastosowań robota. Do wykonywania prac związanych z manipulacją obiektami opracowano lekki manipulator.

a)

b)



Rys. 1. Platforma mobilna robota Elektron: a)widok ogólny, b) podstawowe wymiary (mm)

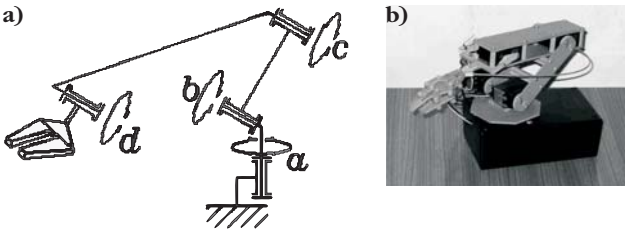
Na rys. 1a pokazano platformę mobilną robota Elektron w widoku ogólnym, a na rys. 1b na tle rysunku konstrukcyjnego zaznaczono podstawowe wymiary gabarytowe robota. Jak widać jest to mały robot mobilny podparty na sześciu kołach, platforma jest odpowiednio sztywna i sztywno podparta na podłożu, co pozwoli na stabilną pracę manipulatora.

Należy zaznaczyć, że niezależnie od liczby stopni swobody robota z manipulatorem, przy planowaniu trzeba uwzględniać sześć składowych położenia końcówki z chwytakiem: trzy współrzędne liniowe wybranego punktu chwytaka w układzie kartezjańskim i trzy współrzędne kątowe orientacji pewnego układu współrzędnych związanego z chwytakiem względem układu kartezjańskiego [7, 8, 9, 12]. Na podstawie doświadczeń własnych zdecydowano, że spośród 3 zmiennych

dr inż. Krzysztof Mianowski – Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Politechnika Warszawska

x, y i φ położenia platformy ruchomej (robot Elektron), podczas manipulacji z użyciem manipulatora dwie pierwsze współrzędne będą wykorzystywane do „zgrubnej" zmiany położenia obiektu manipulowanego, natomiast w manipulatorze – dla uproszczenia konstrukcji i zmniejszenia mocy dysponowalnej układów napędowych w kiści zostaną wprowadzone obroty względem dwóch osi wzajemnie prostopadłych.

Aktualnie możliwe jest opracowanie i wykonanie małych i lekkich manipulatorów z wykorzystaniem typowych elementów handlowych, np. stosowanych w modelarstwie. W ramach wcześniejszych prac w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej PW skonstruowano i wykonano kilka modeli dydaktycznych małych manipulatorów sterowanych komputerowo. Na rys. 2 pokazano prosty i łatwy w wykonaniu model manipulatora z ramieniem o schemacie kinematycznym typu PUMA. Ma on liczbę stopni swobody 4 i niezależne zamykanie/otwieranie chwytaka. Pierw-



Rys. 2. Model prostego manipulatora wykonany z materiałów kompozytowych [14]: a) schemat kinematyczny, b) widok ogólny

szy stopień swobody *a* jest obrotem względem pionowej osi kolumny. Trzy następne stopnie swobody *b, c* i *d* są obrotami (zgięciami) kolejnych członów względem równoległych osi poziomych. Na końcu zamontowany jest chwytak ze szczękami zamykanymi z zastosowaniem mechanizmu równoległowodowego w ten sposób, że szczęki podczas ruchu zamykania/otwierania zachowują stałą orientację względną. Są one wyposażone w elastyczne wykładki z gumy o wysokim współczynniku tarcia. Poszczególne stopnie swobody (pięć) są napędzane z zastosowaniem miniaturowych serwonapędów elektrycznych modelarskich firmy Hitec, przy czym w opracowanym rozwiązaniu napędy zintegrowano z ażurową konstrukcją członów. Elementy konstrukcji wykonano z cienkiej (3 mm grubości) płytki kompozytowej o wysokiej wytrzymałości i małej masie właściwej. Udźwig tego manipulatora wynosi 2 N a maksymalna prędkość obrotowa członów 30°/s.

Należy podkreślić, że dzięki dynamicznemu rozwojowi aktualnie dostępnych systemów komputerowych CAD/CAM/CAE, podczas projektowania nowej konstrukcji manipulatora, projektant może bardziej w pełni niż kiedykolwiek wcześniej wykorzystywać wszelkie zasoby dostępnej wiedzy ogólnej, wiedzę i umiejętności inżynierskie, intuicję, ale przede wszystkim dostępny aparat projektowy, konstrukcyjny i technologiczny [11]. O poziomie opracowania decydują przede wszystkim: wiedza i umiejętności projektanta oraz dobre opanowanie programów komputerowych i biegłość ich obsługi. W niniejszym artykule pokazano, że odpowiednio wykorzystane współczesne narzędzia programowe pozwalają na ukierunkowanie pracy konstruktora metodami „wirtualnego prototypowania" w sposób szybszy i efektywniejszy niż metodami klasycznej analizy naukowej i to już na etapie opracowywania wstępnej koncepcji projektu.

Projekt manipulatora dla robota Elektron

W projekcie manipulatora dla robota Elektron wykorzystano doświadczenia zdobyte podczas projektowania wcześniejszych konstrukcji własnych z uwzględnieniem wyników analiz innych istniejących konstrukcji. Projektowany manipulator ma spełniać ostre założenia co do masy własnej w stosunku do udźwigu przy jak najmniejszej mocy napędu elektrycznego oraz zapewniać możliwość manipulowania niewielkimi przedmiotami w okolicy platformy, z ewentualnym ich popychaniem/ciągnięciem podczas jazdy robota po podłożu. W związku z niesprecyzowanym dokładniej zakresem zadań potrzebne więc było dodanie dodatkowego stopnia swobody orientacji chwytaka, tj. jego obrotu własnego. Dla racjonalnego wykorzystania mocy silników napędowych korzystne jest też umieszczenie jednostek napędowych jak najbliżej podstawy manipulatora. Skorzystano tutaj z wcześniejszych doświadczeń własnych związanych ze stosowaniem mechanizmów równoległowodowych [5, 6]. I tak do transmisji napędu z silnika przy podstawie na trzeci człon ruchomy zastosowano równoległobok płaski o zwiększonym zakresie przenoszonego ruchu obrotowego [1, 4].

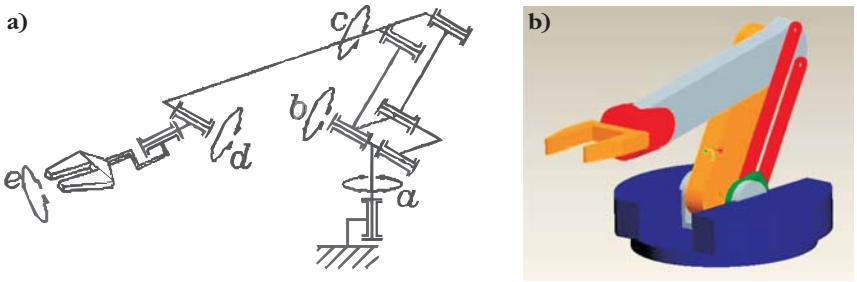
Zadaniem manipulatora jest, po doprowadzeniu końcówki manipulatora robota do odpowiedniej pozycji, bezpieczne uchwycenie przedmiotu, jego utrzymanie przez cały okres realizacji trajektorii i bezpieczne jego uwolnienie w miejscu przeznaczenia. Ważnym czynnikiem jest prawidłowe uchwycenie przedmiotu, często zależne od wielu czynników [8]. Realizację tych samych zadań kinematycznych można zapewnić przez różne typy mechanizmów, jak krzywkowe, dźwigniowe, cięgnowe, zębate czy też kombinowane [3].

W procesie projektowania mechanizmu chwytaka uwzględniono następujące etapy:

- dobór typu mechanizmu
- określenie parametrów geometrycznych decydujących o właściwościach kinematycznych manipulatora
- zwymiarowanie podstawowych elementów konstrukcji mechanicznej w celu zapewnienia wymaganej wytrzymałości i sztywności konstrukcji
- dobór układów łożyskowych
- dobór silników napędowych i przekładni oraz układów transmisji napędu
- oszacowanie podstawowych charakterystyk kinematycznych i dynamicznych.

Schemat kinematyczny pokazany na rys. 2a rozbudowano o dodatkowy stopień swobody *e* obrotu

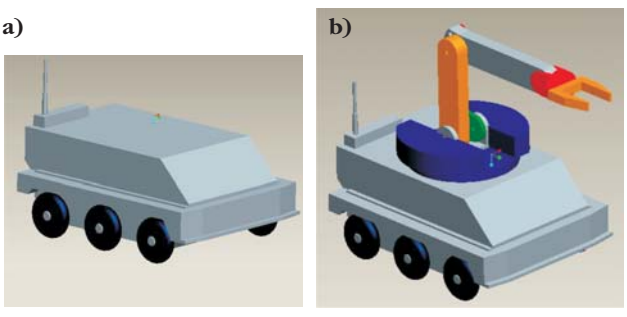
względem osi prostopadłej do osi *d* jak pokazano na rys. 3a. Ponadto dla realizacji ruchu w stopniu swobody *c* wprowadzono równoległobok zapewniający transmisję z silnika umieszczonego na podstawie, który jest współosiowy z silnikiem *b*.



Rys. 3. Model projektowanego manipulatora opracowany w systemie ProEngineer a) schemat kinematyczny, b) widok ogólny

Pokazany na rys. 3a równoległobok, w celu zwiększenia zakresu przenoszonego ruchu obrotowego i wyeliminowania położenia osobliwego mechanizmu, uzupełniono o odpowiednio usytuowany dodatkowy łącznik, jak pokazano na rys. 3b. Przez wprowadzenie do rozwiązania układu mechanicznego manipulatora równoległowodu zapewniono uproszczenie jego modelu kinematyki, podwyższono sztywność konstrukcji, zmniejszono sprzężenia dynamiczne, w szczególności wpływu masy członu trzeciego na napęd drugi, co zapewnia również podwyższenie dokładności i polepszenie podstawowych charakterystyk manipulatora. Należy tutaj podkreślić, że równoległowody pozwalają na poprawę właściwości kinematycznych i dynamicznych umożliwiając np. zdalny napęd dalszych członów manipulatora z silników zamocowanych na podstawie lub w jej pobliżu, co też upraszcza sterowanie. Warto dodać, że w opracowanym rozwiązaniu udało się zintegrować mechanizm równoległowodu z członem drugim, wbudowując go do prostokątnej rury stanowiącej lekką konstrukcję powłokową tego członu (na rys. 3b człon ten odkryto). Zapewnia to kompaktową, zwartą konstrukcję o wysokich właściwościach funkcjonalnych i relatywnie małej masie własnej.

Projekt konstrukcji manipulatora opracowano z wykorzystaniem programu ProEngineer. Na rys. 4 pokazano sposób montażu manipulatora na platformie mobilnej robota Elektron.



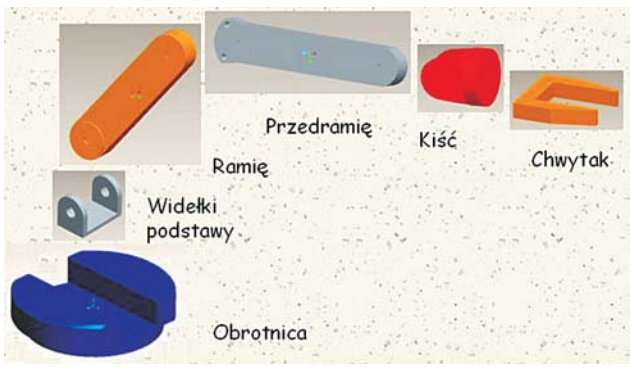
Rys. 4. Projekt 3D: a) Robota Elektron, b) manipulatora zamontowanego na robocie Elektron

Wymiary podstawy manipulatora stanowiącej tutaj obrotnicę względem osi pionowej i jej kształt (okrągły walec o osi pionowej) dobrano w ten sposób, aby całkowicie mieściła się w obrysie zewnętrznym platformy niezależnie od kąta obrotu, jednocześnie wewnątrz uzyskanej w ten sposób przestrzeni zaplanowano umieszczenie pełnego wyposażenia elektryczno-elektronicznego.

Projektowanie z wykorzystaniem systemu 3D zapewniło możliwość jednoczesnego prowadzenia prac nad rozwojem koncepcji projektu, dokonywania na bieżąco niezbędnych analiz i obliczeń w zakresie wytrzymałości i dynamiki. Przede wszystkim możliwe było, już na etapie opracowania projektu, najbardziej racjonalne rozmieszczenie poszczególnych elementów składowych i związana z tym minimalizacja obszaru przestrzeni zajmowanej przez opracowywany zespół. W szczególności rozmieszczenie silników napędowych z przekładniami oraz rozmieszczenie dodatkowego wyposażenia, jak mikrowyłączniki krańcowe i synchronizacyjne, okablowanie, łączówki elektryczne, układy elektroniczne, udało się bardzo estetycznie zintegrować z konstrukcją manipulatora, tworząc kompaktową konstrukcję mechatroniczną.

Animacja współpracy poszczególnych podzespołów pozwoliła na optymalne wykorzystanie miejsca dla mechanizmów, a także zintegrowanie wszystkich pozostałych elementów składowych (elektronika, akumulatory, dodatkowe wyposażenie) w jedną całość i umieszczenie ich w estetycznej obudowie na podstawie. Niezależnie od tego opracowano też elementy wirtualnej rzeczywistości, w której pracuje robot, dzięki czemu możliwe jest przeprowadzenie wstępnych symulacji pracy manipulatora we współpracy z robotem, np. w trakcie symulowanej misji. Wstępne badania symulacyjne pozwoliły w sposób racjonalny dobrać parametry silników i układów przekładniowych oraz dodatkowych układów odciążających i wykazały prawidłowość przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych i poprawną pracę układów mechanicznych i napędowych.

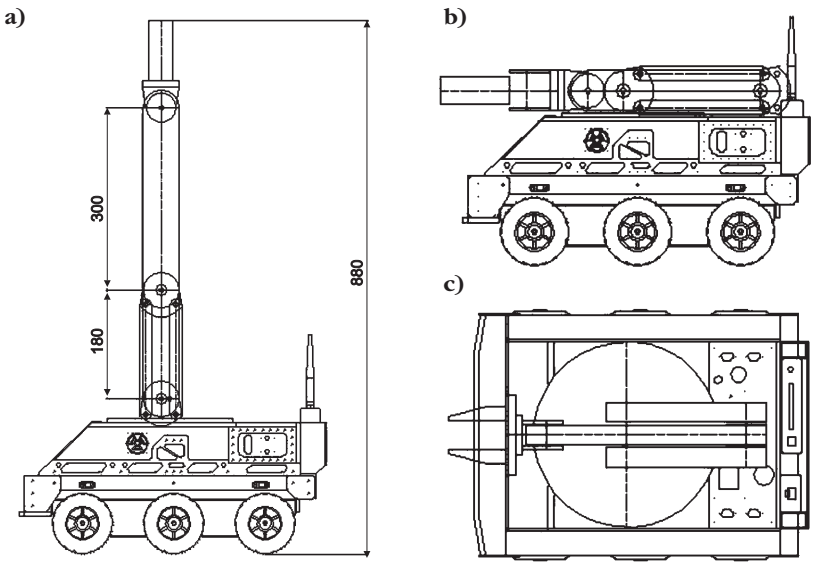
Na rys. 5 pokazano podstawowe elementy konstrukcyjne manipulatora.



Rys. 5. Podstawowe elementy składowe manipulatora

Człon pierwszy manipulatora ma kształt obrotnicy z widełkami mocowania członu drugiego i zostanie wykonany z lekkiego duraluminium. Człony drugi i trzeci, prototypu manipulatora, są wykonane z prostokątnych lekkich rur duraluminiowych, zakończonych odpowiednio wyprofilowanymi gniazdami łożysk dla połączenia ich między sobą oraz z członami pierwszym i czwartym. Wewnątrz tych członów są umieszczone równoległowody transmitujące napęd z układów napędowych na członie pierwszym (podstawie-obrotnicy) do członu trzeciego oraz czwartego. Możliwe jest zastąpienie układu dwóch równoległowodów transmisji napędu do członu czwartego, umieszczonych w członie drugim i trzecim, dwoma przekładniami paskowymi zębatymi o współczynniku przełożenia 1:1. Człon czwarty ma kształt widełek obejmujących człon trzeci, zaś człon piąty stanowi prosty mechanizm obrotowy, na którym zamocowany jest chwytak.

W podsumowaniu należy zaznaczyć, że uzyskano bardzo proste, lekkie i tanie rozwiązanie manipulatora o wysokiej funkcjonalności i parametrach kinematycznych i dynamicznych odpowiednio dopasowanych do możliwości platformy mobilnej Elektron.



Rys. 6. a) Podstawowe wymiary manipulatora, b), c) manipulator w stanie złożonym w rzutach z boku i z góry

Rys. 6a przedstawia podstawowe wymiary zaprojektowanej konstrukcji. Na rys. 6b i c pokazano manipulator w stanie złożonym.

Warto podkreślić, że wraz z chwytakiem konstrukcja została dokładnie dopasowana do platformy mobilnej, zaś dzięki kompaktowej konstrukcji modułowej stanowi estetyczne uzupełnienie dotychczasowego rozwiązania robota. Mimo dokładnego dopasowania, zasięg manipulatora z chwytakiem jest stosunkowo duży; może on sięgać do podłoża wszędzie wokół robota oraz w górę nawet na wysokość ok. 800 mm.

Podstawowe właściwości funkcjonalne manipulatora

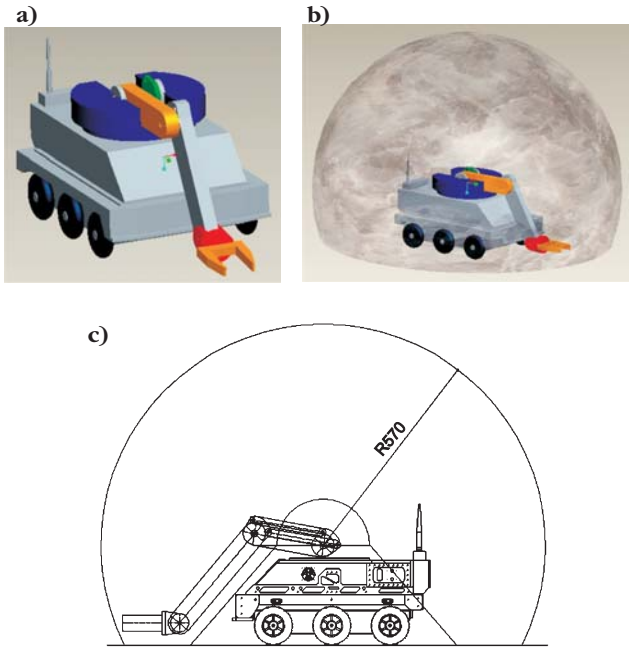
Model 3D manipulatora zamontowany na robocie Elektron opracowany w systemie ProEngineer w kilku typowych konfiguracjach pokazano na rys. 7.

W konstrukcji manipulatora napęd pierwszego stopnia swobody jest zrealizowany z zastosowaniem silnika elektrycznego I z przekładnią o stałym przełożeniu, dzięki czemu uzyskano stałość charakterystyki kinematycznej i niewielkie zmiany charakterystyki obciążeniowej silnika związane z pochylaniem/przechylaniem się robota na gruncie w polu grawitacyjnym Ziemi. Zapewnia to łatwość sterowania i stabilną pracę układu napędowego.

Drugi stopień swobody – ramię II jest napędzane przez bezpośrednio z nim sprzężony silnik II z przekładnią o stałym przełożeniu, zamocowany na podstawie. Ramię II z początkowego położenia poziomego może unosić się obracając od 0° do 90° (rys. 7a) a następnie opadać, nadal obracając się od 90° do 180° (rys. 7c). Na końcu ramienia II zamontowane jest przedramię III, którego napęd jest również przekazywany z podstawy, tutaj z zastosowaniem równoległowodu. Równoległowód powoduje, że na ramię II nie jest przenoszony zmienny, w zależności od kąta obrotu przedramienia, moment mechaniczny, lecz tylko siła ciężkości przedramienia wraz z zamontowanymi na nim dalszymi członami i obciążeniem chwytaka. Charakter tego wpływu jest dokładnie taki sam jak od siły ciężkości ramienia, przy czym zmienność obciążenia układu napędowego ramienia II ma charakter cosinusoidalny i można go skompensować np. za pomocą przeciwciężaru lub sprężyn. Odpowiedni układ kompensacyjny z zastosowaniem sprężyn i mechanizmu mimośrodowego udało się umieścić w podstawie. Maksymalna wartość momentu obciążenia pojawia się na krańcach przedziału zmienności kąta obrotu członu i, znając masy członów oraz ich wymiary, łatwo ją oszacować. Doboru silnika II z przekładnią dokonano zwiększając tę wartość o ok. 30 %. Moc silnika oszacowano zakładając maksymalną wartość prędkości kątowej członu z uwzględnieniem sprawności całego toru napędowo-transmisyjnego.

Trzeci i czwarty stopnie swobody manipulatora – przedramię III i kiść IV są napędzane przez równoległowody z silników na podstawie, więc ich kąty obrotu są mierzone względem podstawy. W takiej sytuacji obciążenie momentem układu napędowego stopnia III, który ma zakres ruchu obrotowego od 0° do 90° ma podobny charakter jak stopnia II w połowie zakresu ruchu. Moc użytego silnika napędowego okazała się o ok. 15 % większa niż moc silnika II. W takiej sytuacji

oba silniki przyjęto takie same, z takimi samymi przekładniami, zaś dodatkowo przewidziano układ odciążający z użyciem sprężyn. Układ ten udało się również umieścić w podstawie.



Rys. 7. Zakres przestrzeni roboczej manipulatora:
a) przykładowa konfiguracje dla realizacji misji,
b) zakres obszaru podejścia końcówką chwytaka,
c) wymiary przestrzeni roboczej

Układ napędu kiści jest obciążony zmiennym momentem o charakterze cosinusoidalnym w zakresie kąta obrotu -90° do 180°. Maksymalna wartość pojawia się w położeniu poziomym kiści w sytuacji maksymalnego obciążenia chwytaka i została oszacowana na ok. 1/3 momentu jak dla przedramienia. Zakładając takie same wartości prędkości kątowej, otrzymano moc silnika IV, do napędu kiści, jako 1/3 mocy silników II i III. Parametry silnika napędu obrotu kiści V oszacowano na podstawie wielkości przewidywanych obiektów manipulacji oraz przewidywanej wartości przesunięcia ich środka ciężkości względem osi obrotu kiści.

W podsumowaniu należy dodać, że w zaprojektowanym manipulatorze przegubowym silniki napędowe II, III i IV stopnia swobody znalazły się na obrotnicy, przy czym ich masa nie powoduje zwiększenia bezwładności jak też nie wywołuje stałego ani zmiennego obciążenia grawitacyjnego układów napędowych żadnego z tych członów. Zapewnia to znaczne zmniejszenie sumarycznej mocy silników napędowych. Jest to spowodowane przez zastosowanie równoległowodowej transmisji napędu na człony III i IV, co ponadto znacznie upraszcza model kinematyki manipulatora. Taki manipulator ma w dużym zakresie przestrzeni roboczej bardzo dobre właściwości kinematyczne, określone przez korzystny poziom manipulacyjności kinematycznej i tzw. zręczności, jak też zapewnia wysoką uniwersalność (wszechstronność), co jest z kolei związane z izotropowością charakterystyk kinematycznych i dynamicznych manipulatora. Takie rozwiązanie charakteryzuje się ponadto korzystnymi właściwościami w zakresie identyfikacji wpływu błędów układów pomiarowych – model wpływu rozdzielczości układów pomiarowych na wynikowy błąd położenia końcówki w układzie kartezjańskim jest dość prosty, czytelny i łatwo interpretowalny.

Otrzymane rozwiązanie ma bardzo prosty i czytelny model kinematyki, zarówno prostej jak i odwrotnej.

Podsumowanie i wnioski

Przy opracowaniu projektu zupełnie nowego manipulatora dla robota mobilnego Elektron bardzo dobrym i użytecznym narzędziem okazało się prototypowanie wirtualne i modelowanie przestrzenne. Model manipulatora został sparametryzowany, więc możliwe jest rozważanie różnych wersji jego rozwiązania. Podstawowe wymiary i inne parametry dobrano w modelu stosownie do potrzeb rozważanego problemu i wymagań konstruktora. Z zastosowaniem programów komputerowych możliwe okazało się formułowanie różnych warunków ograniczeń i różnych kryteriów. Na przykład wizualizacja zakresu przestrzeni roboczej w programach projektowych 3-D daje konstruktorowi możliwość poprawy podstawowych właściwości kinematycznych konstrukcji już na etapie projektu wstępnego.

Opracowana koncepcja manipulatora o pięciu stopniach swobody charakteryzuje się założonymi własnościami kinematycznymi i w zakresie dokładności, adekwatnie do przewidywanych zadań robota. Opracowana wersja manipulatora ma kompaktową konstrukcję modułową i relatywnie duży zakres przestrzeni roboczej, więc może być wykorzystana również do innych zastosowań.

Nowa koncepcja manipulatora przedstawiona w tej pracy może okazać się atrakcyjna także w wybranych rozwiązaniach produkcji zautomatyzowanej, na przykład do obsługi magazynów i palet transportowych lub technologicznych. Poruszona problematyka badawcza wymaga dalszych obszernych badań zarówno teoretycznych i symulacyjnych jak i doświadczalnych. Dotyczy to w szczególności algorytmów planowania ruchów manipulatora na platformie jezdnej.

Podziękowania

Praca była finansowana przez Uczelniany Program Badawczy Politechniki Warszawskiej „Heterogeniczna sieć współpracujących robotów mobilnych" w roku 2007.

Bibliografia

1. Chironis N. P.: *Mechanisms, Linkages and Mechanical Control*, McGraw-Hill Book Company, 1965.

2. Chojecki R., Olszewski M., Marcinkiewicz P.: *Miniaturowe roboty mobilne z Instytutu Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej*, w „Postępy Robotyki" pod. red. K. Tchonia, WKŁ, Warszawa 2005, t. II, Przemysłowe i medyczne systemy robotyczne, str. 311–320.
3. Dietrich M., red.: *Podstawy konstrukcji maszyn*, PWN, Warszawa 1986.
4. Matone R., Roth B.: *Designing manipulators for both kinematic and dynamic isotropic properties*, Proc. RoManSy'96.
5. Mianowski K.: *Modele manipulatorów do celów dydaktycznych ITLiMS PW*, mat. Konf. AUTOMATION 2006, Wyd. PIAP, Warszawa 2006, str. 212–225.
6. Mianowski K., Nazarczuk K.: *Nowe koncepcje manipulatorów z mechanizmami równoległowodowymi*, w „Postępy Robotyki" pod. red. K. Tchonia, WKŁ, Warszawa 2006, t. II, Systemy i współdziałanie robotów, str. 13–30.
7. Morecki A., Knapczyk J.: *Podstawy robotyki, teoria i elementy manipulatorów i robotów*, Praca zbiorowa, WNT, wyd. 3, Warszawa 1999.
8. Morecki A., Knapczyk J., Kędzior K.: *Teoria mechanizmów i manipulatorów, podstawy i przykłady zastosowań w praktyce*, WNT, Warszawa 2002.
9. Nof S. Y., red.: *Handbook of Industrial Robotics*, John Wiley &Sons, Inc., New York, Chichester, Weiheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 1999.
10. Szynkiewicz W., Chojecki R., Rydzewski A., Majchrowski M., Trojanek P.: *Modułowy robot mobilny Elektron*, w „Postępy Robotyki" pod. red. K. Tchonia, WKŁ, Warszawa 2006, t. I, Sterowanie, percepcja i komunikacja, str. 265–274.
11. Tryliński W.: *Metodyka konstruowania urządzeń precyzyjnych*, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
12. Yoshikawa T.: *Dynamic Manipulability of Robot Manipulators*, Journal of Robotics Systems, 2(1), J. Wiley & Sons, Inc. 1985, pp. 113–124.
13. http://www.piap.pl/ – Strona internetowa Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów w Warszawie.
14. www.lynxmotion.com – Strona internetowa modeli robotów.